

红外热成像甲烷探测系统的双通带滤波器

付秀华^{1**}, 刘文奇^{1*}, 尹士平², 刘克武², 刘冬梅¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 广东先导先进材料股份有限公司, 广东 清远 511517

摘要 基于甲烷的红外吸收光谱,通过光谱拆分法实现了一种双通带滤波器的设计。通过调节离子源束流,改善了 ZnS 膜层的折射率,消除了背景噪声。通过引入可控薄层,降低了非周期窄带通膜系的制备难度。经实验测试与分析,所研制的双通带滤波器在 3.31 μm 和 7.67 μm 的透射率分别为 89.25%、81.97%,达到了提高探测系统灵敏度的目的。

关键词 薄膜; 滤波器; 红外热成像; 拆分技术; 聚集密度; 膜层敏感度

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1231001

Dual-Bandpass Filter in Infrared Thermal Imaging System for Methane Detection

Fu Xiuhua^{1**}, Liu Wenqi^{1*}, Yin Shiping², Liu Kewu², Liu Dongmei¹

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Guangdong Vital Advanced Materials Co., Ltd., Qingyuan, Guangdong 511517, China

Abstract Based on the infrared absorption spectrum of methane, a dual-bandpass filter is designed by the spectral splitting. With the adjustment of ion source beams, the refractive index of the ZnS film layer is improved and the background noise is eliminated. The fabrication difficulty of aperiodic narrow-bandpass filter films is reduced by the introduction of controllable thin film layers. The experimental test and analysis show that the prepared dual-bandpass filter possesses the transmissivity of 89.25% at 3.31 μm and 81.97% at 7.67 μm , respectively, and the goal for improving the sensitivity of detecting systems is achieved.

Key words thin films; filter; infrared thermal imaging; splitting technique; gather density; film layer sensitivity

OCIS codes 310.1860; 310.6805; 310.6860; 040.3060

1 引言

被动式红外热成像技术能够实现甲烷等危险气体的远距离非接触探测,具有灵敏度高、反应速度快、视场范围大等优点,且成像动态直观,能够实现危险气体泄漏的在线实时监控^[1-2],故被广泛应用于工业制造、油矿开采、气体储运等领域^[3]。其中具有代表性的被动式红外热成像仪有法国 Bertin 公司的 Second Sight 系列成像仪^[4]和美国 FLIR 公司的 GF 系列成像仪^[5]。

国内气体红外热成像技术起步晚,近几年的研究成果大多集中在探测模型、处理电路及算法和气体红外成像的图像处理方法上^[6-8]。而在热成像仪

滤波器的研制上,熊仕富等^[9-10]研制了一种红外热成像仪的单通带滤波器。单通滤波器在探测甲烷单个波段的红外特征吸收光谱时,会损失另一个波段的特征吸收光谱,从而制约了被动式甲烷红外热成像探测系统的分辨率和灵敏度的提升。双通带滤波器能够实现两个特征峰信息的探测,在中波至长波红外都具有良好的光谱响应特性,因而能够进一步提升系统的灵敏度和响应速度,从而提升甲烷气体探测系统的性能。

2 材料选择

甲烷气体探测系统的结构如图 1 所示,其光学系统部分由保护窗口、红外滤波器、红外光学成像系

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-07-06; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203002GX)

* E-mail: lwq_optics@126.com; ** E-mail: goptics@126.com

统及宽光谱非制冷红外焦平面探测器组成,光学系统之外的部分包括处理、分析单元及显示输出和报警模块。红外滤波器是系统的关键组成部分,其技术参数可通过测试甲烷气体的红外吸收光谱曲线得到。

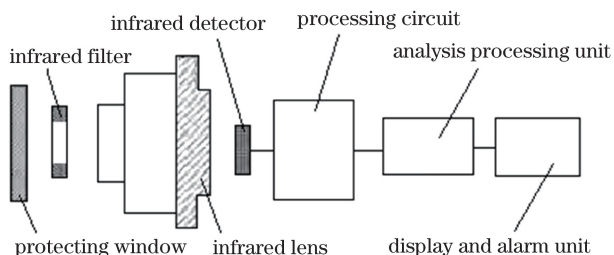


图 1 甲烷气体探测系统的结构组成

Fig. 1 Structural diagram of detection system of methane

甲烷实测的红外吸收光谱曲线如图 2 所示,可以看出,甲烷分别在 3021 cm^{-1} 和 1304 cm^{-1} 两个波数位置出现吸收峰值,对应波长为 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $7.67\text{ }\mu\text{m}$,且其在 $3.13\sim 3.51\text{ }\mu\text{m}$ 和 $7.14\sim 8.33\text{ }\mu\text{m}$ 两个波段有吸收响应。

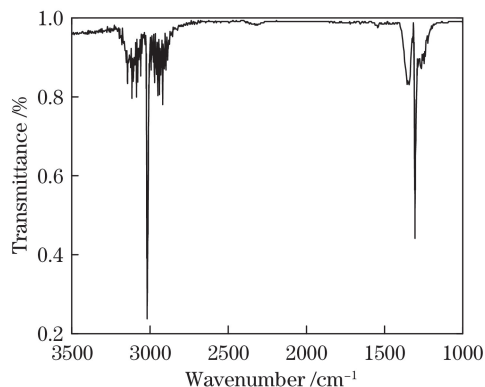


图 2 甲烷的红外吸收光谱

Fig. 2 Infrared adsorption spectrum of methane

甲烷吸收光谱探测系统的响应灵敏度可表示为

$$P(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) \cdot T(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中 $f(\lambda)$ 为甲烷气体的吸收光谱曲线; $C(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 时的灵敏度,由于探测器不变, $C(\lambda)$ 一般为定值; $T(\lambda)$ 为滤光片在波长 λ 时的透射率; (λ_1, λ_2) 为积分波长区间。

由(1)式可知,通过提高甲烷特征峰光谱响应较强波段的滤光片透射率和降低背景噪声较大波段的滤光片透射率,可以提高甲烷吸收光谱探测系统的响应灵敏度。甲烷在 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 附近的吸收强度高于 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 的,因此 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 附近的特征信号要强于

$7.67\text{ }\mu\text{m}$ 的。应用环境中的主要杂质为水分和二氧化碳,这两种杂质气体在 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 附近的吸收现象弱于 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 的,在 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 处产生的背景噪声比 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 处的明显^[11]。因此,为了提高灵敏度和信噪比,滤光片在 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 处的通带带宽应尽量窄以降低背景噪声。根据以上分析并结合制备工艺条件确定光谱设计参数,具体参数见表 1。

表 1 滤光片的光谱设计参数

Table 1 Designed spectral parameters of filter

Wavelength / μm	3.16-3.46	3.66-7.42	7.64-7.70	7.92-10
Transmittance /%	>80	<1	>80	<1

红外滤光片的基片一般采用锗片和硅片,锗片的折射率约为 4.0,不考虑吸收和散射时其透射率约为 47%,硅片折射率约为 3.4,不考虑吸收和散射时其透射率约为 54%^[12]。锗片和硅片的基底透射率光谱的实测曲线如图 3 所示,可以看出,在 $6.0\text{ }\mu\text{m}$ 以后,硅片出现了明显的吸收,在 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 附近吸收达到了 5%左右,而锗片吸收很小,因此选择锗片作为基底材料。

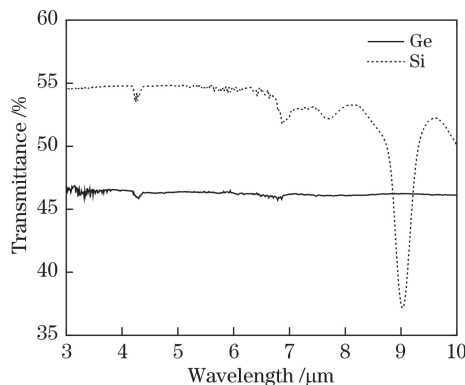


图 3 锗片和硅片的透射率曲线

Fig. 3 Transmittance curves of germanium wafer and silicon wafer

光谱透射区涉及中波红外和长波红外波段,因此要选择在 $3.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $7.67\text{ }\mu\text{m}$ 附近吸收较小的材料。满足这一要求的高折射率镀膜材料有 Ge, Ge 的折射率可达到 4.2 左右,经电子束蒸发后呈张应力。中折射率材料有 ZnS 和 ZnSe^[13], ZnSe 的抗潮性差,容易潮解, ZnS 的折射率在 2.2 左右,经电子束蒸发后呈压应力,压应力和张应力交替出现可削弱累积应力,从而使膜系整体更牢固^[14],因此 ZnS 膜层和 Ge 膜层的匹配性能较好。低折射率材料有 YbF₃, YbF₃ 经阻蒸加热后薄膜整体呈张应力,和 ZnS 的匹配性能较好。YbF₃ 的折射率为 1.46,是这

一波段折射率最低的材料。光学厚度的表达式为

$$N_d = \frac{1}{4} \lambda_0 n d, \quad (2)$$

式中 n 为折射率; d 为物理厚度; λ_0 为中心波长。故在 λ_0 处实现相同光学厚度 N_d 时, 折射率 n 越小, 物理厚度 d 越大, 尤其是当 λ_0 处于红外波段时, 其单层膜的物理厚度 d 往往会达到 $1 \mu\text{m}$ 以上, 在这种情况下 YbF_3 膜层易发生裂膜, 影响耐用性。因此不考虑 YbF_3 作为低折射率材料。综上所述, 分别选择 Ge 和 ZnS 作为高、低折射率薄膜材料。

3 理论与设计

滤光片的光谱曲线要求较为复杂, 以现有的制备工艺难以实现。因此利用拆分技术将光谱要求合理地分解到两个面上。经过设计发现以 $6.0 \mu\text{m}$ 为截止分界点进行拆分设计难度最低, 同时两面膜层都具有较高的实验可行性。经拆分, 前表面膜系在 $3.16 \sim 3.46 \mu\text{m}$ 高透射, $3.71 \sim 6.0 \mu\text{m}$ 截止, 同时要保证在 $7.67 \mu\text{m}$ 附近也有高的透射率。后表面膜系实现 $7.64 \sim 7.70 \mu\text{m}$ 波段通带高透射, $6.0 \sim 7.47 \mu\text{m}$ 和 $7.87 \sim 10 \mu\text{m}$ 截止, 同时保证 $3.16 \sim 3.46 \mu\text{m}$ 也具有高透射率。

3.1 前表面膜系设计

为降低设计难度, 根据光谱设计要求选择最佳初始膜系。前表面膜系选用短波通干涉截止膜系作为初始膜系进行优化设计较为合理。短波通干涉截止膜系的基础膜系为 $\text{Sub} | (0.5L H 0.5L)^S | \text{Air}$, 其中 Sub 代表基底材料, Air 代表空气层, S 为周期数, H 和 L 分别表示高低折射率材料。膜系还可以表示为 $\text{Sub} | 0.5L (HL)^S H 0.5L | \text{Air}$, 相当于在一个多层介质高反射膜系两侧各加一层半个光学厚度的低折射率膜层, 可以达到平滑短波通带的效果。 λ_0 为有效透射区和有效反射区的分界点, 以 n_H 和 n_L 分别表示高低材料的折射率, 则其截止带半带宽 Δg 为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right). \quad (3)$$

因此, 前表面膜系的中心波长 λ_1 为

$$\lambda_1 = \lambda_0 (1 - \Delta g). \quad (4)$$

根据光谱设计要求, 短波通带和长波截止带的分界点在 $3.56 \mu\text{m}$ 处, $n_H = 4.24$, $n_L = 2.26$, 根据(4)式可计算得出 λ_1 约为 $4.56 \mu\text{m}$, 即前表面膜系的中心波长为 $4.56 \mu\text{m}$ 。借助 OptiLayer 软件进行优化, 得到的最优解为 $\text{Sub} | 0.94L 0.34H 0.06L 1.11H$

$0.79L 0.87H 0.62L 0.08H 0.62L 0.25H 0.96L 0.98H 0.98L 0.97H 0.96L 0.94H 0.97L 1.05H 1.15L 1.51H 1.24L 1.08H 1.03L 0.65H 0.37L 0.16H | \text{Air}$ 。图 4 所示为不考虑后表面未镀膜反射和考虑背面未镀膜反射的优化结果, 即出射介质分别为锗和空气。可以看出, 不考虑后表面未镀膜反射时, $3.31 \mu\text{m}$ 和 $7.67 \mu\text{m}$ 通带波段实现了高透射, 但在 $3.7 \sim 6 \mu\text{m}$ 波段上出现了 $4.49 \mu\text{m}$ 和 $5.42 \mu\text{m}$ 两个透射率大于 1% 的次峰。

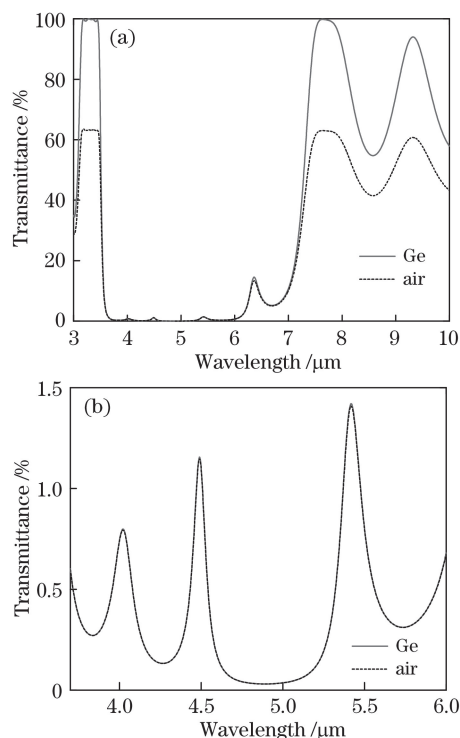


图 4 前表面膜层的初步设计光谱曲线。

(a) $3 \sim 10 \mu\text{m}$; (b) $3.7 \sim 6 \mu\text{m}$

Fig. 4 Predesigned spectral curves of front layers.

(a) $3 \sim 10 \mu\text{m}$; (b) $3.7 \sim 6 \mu\text{m}$

根据分析, 这是由于基础膜系的截止带半带宽 Δg 不够大, 因此需要提高 Δg , 将(3)式括号中的上下项同时除以 n_L , 得到

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H/n_L - 1}{n_H/n_L + 1} \right). \quad (5)$$

由(5)式可知, n_H/n_L 值越大, Δg 越大, 可知截止带宽仅与高低折射率之比有关。因此可以通过改变 Ge 和 ZnS 本身的折射率来提高比值, 即提高 Ge 的折射率和降低 ZnS 的折射率^[15]。

从膜层的微观结构分析, 通过电子束蒸发沉积的薄膜会呈现柱状加空穴结构, 薄膜中柱体的体积为 V_s , 空穴的体积为 V_A , 则薄膜的总体积 V 为

$$V = V_s + V_A. \quad (6)$$

则可以定义膜层的聚集密度 ρ 为

$$\rho = \frac{V_s}{V} \quad (7)$$

可得材料的折射率

$$n = n_v(1 - \rho) + n_s\rho, \quad (8)$$

式中 n_s 为材料柱体的折射率; n_v 为空穴的折射率。进一步可得折射率与聚集密度之间的线性关系为

$$n = (n_s - n_v)\rho + n_v. \quad (9)$$

膜层吸潮前空穴的折射率为空气的折射率, $n_v=1.0$; 吸潮后空穴的折射率变为水的折射率, $n_v=1.33$ 。由于 Ge 和 ZnS 的柱体折射率 n_s 都大于 1.33, 故材料的折射率与聚集密度 ρ 呈线性增大关系。因此通过改变薄膜沉积工艺来改变聚集密度。在各项工艺参数中, ZnS 膜的聚集密度对离子束辅助沉积(IAD)时的烘烤温度和离子束流两项工艺参数的变化较为敏感。降低烘烤温度时, 衬底的表面活性减小, 不利于膜层的结合, 从而降低聚集密度。但是烘烤温度的变化也会导致 Ge 膜微观结构的改变^[16], 聚集密度也会随着烘烤温度的降低而减小^[17]。电子束蒸发的 ZnS 膜结构为柱状生长结构^[18], 可通过减小 ZnS 膜沉积时的离子束流来降低 ZnS 膜层的聚集密度。减小 IAD 离子束流会使淀积粒子的迁移率降低, 从而降低膜层的聚集密度。但是离子源束流只能适当减小, 过小会影响薄膜的结合牢固性, 对其耐用性造成影响。此外, 由(9)式可知, 聚集密度过小会导致空穴增多, 空穴吸潮后 n_v 会从 1.0 变为 1.33, 其直接结果是薄膜光学厚度发生变化, 光谱曲线漂移, 这对于红外滤光片是致命的。

保持烘烤温度为 130 °C, 改变 IAD 离子束流, 在锗片上沉积单层 ZnS 膜, 测得透射、反射光谱后拟合 ZnS 膜在不同 IAD 离子束流下的折射率。图 5 所示为不同离子束流下 ZnS 膜的折射率色散分布曲线, 可以看出, IAD 离子束流越小, ZnS 膜的折射率越小, 当 IAD 离子束流为 40 mA 时, ZnS 膜层的折射率降低至 2.2 以下, 有利于改善噪声截止效果。

进一步优化设计, 得到膜系 Sub|1.09L 0.16H 0.12L 0.75H 0.58L 1.45H 0.47L 0.85H 1.01L 0.97H 0.96L 0.94H 0.94L 0.97H 1.05L 1.49H 1.33L 1.11H 1.17L 1.63H 0.21L 0.09H 0.38L 0.83H 0.25L 0.30H|Air。图 6 所示为单面设计的透射率曲线, 不考虑背面未镀膜的反射时, 3.16 ~ 3.46 μm 、7.57 ~ 7.77 μm 的平均透射率分别为

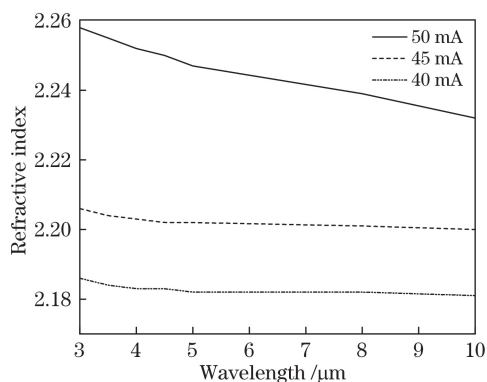


图 5 不同工艺参数下 ZnS 的折射率色散分布曲线
Fig. 5 Refractive index dispersion curves of ZnS under different process parameters

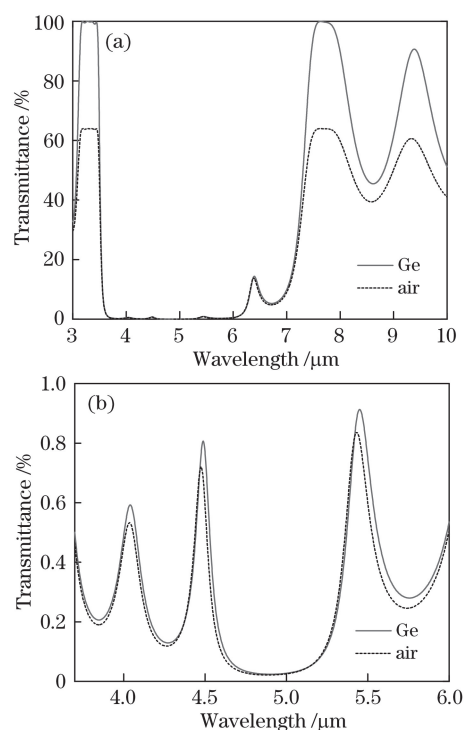


图 6 前表面膜层的最终理论设计光谱曲线。
(a) 3~10 μm ; (b) 3.7~6 μm

Fig. 6 Final theoretical spectral curves of front layers.

(a) 3-10 μm ; (b) 3.7-6 μm

99.64%、99.75%, 3.70 ~ 6.0 μm 的平均透射率为 0.25%, 且刺峰最大透射率为 0.84%, 小于 1%。

3.2 后表面膜系设计

根据光谱设计要求, 后表面的初始膜系采用全介质双半波窄带通膜系较为适合。全介质双半波窄带通膜系有两种结构, 即其半波间隔层分别为高折射率材料和低折射率材料。根据对称等效膜系理论, 双半波窄带通膜系在中心波长处等效于间隔层, 即一个光学厚度的单层膜。对比 Ge 膜, ZnS 膜的折射率低, 对基底锗能起到较好的增透效果, 因此,

初始膜系选择间隔层为低折射率材料的全介质双半波窄带通膜系,此时膜系具有较高的通带峰值。通带的半峰全宽为峰值透射率一半处的波长宽度,在基片折射率 n_g 和材料折射率 n_H, n_L 已知情况下,其值与间隔层的偶数倍数 m 和反射板的干涉级次 s 有关,其表达式为

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2s-1} n_g}{m\pi n_H^{2s}} \times \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m} \quad (10)$$

根据(10)式,结合光谱设计要求与现有工艺条件,取 $s=1, m=1$ 较适合。中心波长为通带中心, $\lambda_0=7.67 \mu\text{m}$ 。通带峰值为 99.25%,通带的半峰全宽为 190 nm,膜系在 $6.0\sim 7.3 \mu\text{m}$ 以及 $7.8\sim 10.0 \mu\text{m}$ 有较好的截止效果,透射率均小于 1%。此时初始膜系接近于光谱设计要求,能够降低设计难度。通过软件添加优化目标优化,使膜系在 $3.16\sim 3.46 \mu\text{m}$ 也有高透射率。

非规整窄带膜系的制备难度大,其通带的峰值透射率易受两侧反射板的累计误差影响而被压低。非规整膜系的变量较多,因此在优化膜系时控制敏感薄层层数为 1~2 层以减少反演分析时需要控制的变量,从而达到降低制备难度、减少实验次数的目的。经过优化设计后,最终得到膜系:Sub|0.10L 0.24H 1.02L 1.01H 1.02L 0.95H 0.32L 0.10H 0.24L 0.20H 1.00L 1.02H 0.98L 0.95H 1.02L 0.96H 0.95L 1.09H 0.99L 0.28H 0.58L 0.86H 1.19L 0.62H 0.38L|Air。图 7 所示为后表面单面设计的透射率曲线,不考虑背面未镀膜的反射时, $3.16\sim 3.46 \mu\text{m}, 7.64\sim 7.70 \mu\text{m}$ 的平均透射率均大于 99%,截止区 $6.0\sim 7.47 \mu\text{m}, 7.87\sim 10 \mu\text{m}$ 的平均透射率分别为 0.31%、0.39%。后表面膜层的膜层敏感度如图 8 所示,膜层敏感度主要集中于第 10 层和第 20 层膜,在制备过程中,通过反演分析调节第

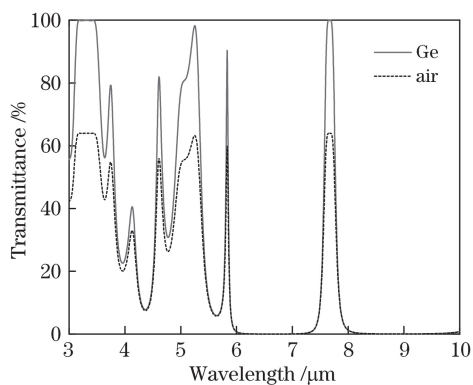


图 7 后表面膜层的理论设计光谱曲线
Fig. 7 Theoretical spectral curves of back layers

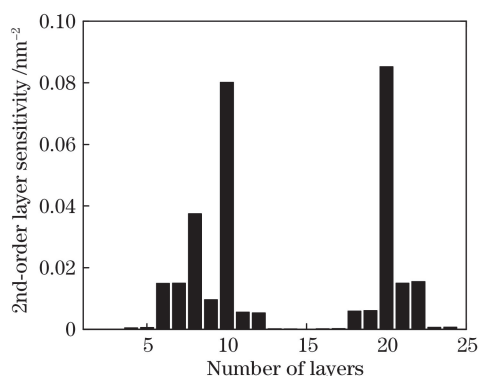


图 8 后表面膜层的膜层敏感度
Fig. 8 Layer sensitivity of back layers

10 层和第 20 层的物理厚度来调节光谱曲线直至达到要求。

将前后表面膜系导入 TFCalc 软件中得到了双面膜层设计的光谱曲线,如图 9 所示。可以看出, $3.16\sim 3.46 \mu\text{m}$ 的平均透射率为 99.54%,通带的峰值透射率为 99.98%, $7.64\sim 7.70 \mu\text{m}$ 的平均透射率为 99.79%,窄带的峰值透射率为 99.93%,截止区 $3.71\sim 7.47 \mu\text{m}, 7.87\sim 10 \mu\text{m}$ 的平均透射率分别为 0.28%、0.39%。

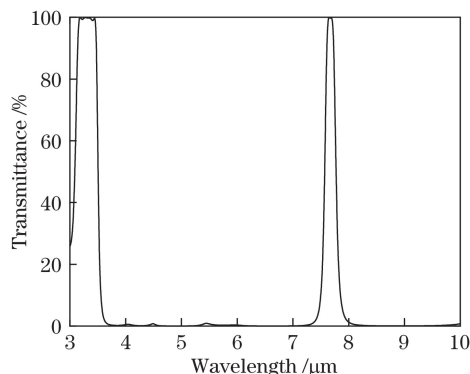


图 9 双面膜层设计的理论光谱曲线
Fig. 9 Theoretical spectral curves of double-side design

4 制备与测试分析

4.1 制备工艺参数

实验设备为成都西沃克真空科技有限公司生产的 CVAC ZZC-1100 型真空镀膜机,配备有双电子枪、考夫曼离子源、XTC/3S 晶体膜厚控制仪以及十二探头晶控系统。实验前将基片擦拭干净后装到工件盘上,抽真空至 $4.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 时用离子源清洗基片,离子源气体为氩气,清洗束流为 40 mA。基片烘烤温度设定为 $130 \text{ }^\circ\text{C}$,当恒温时间达到 20 min 时,按照表 2 所示的工艺参数进行沉积。Ge 膜和 ZnS 膜均采用电子束蒸发方式进行沉积。镀膜完成

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

Material	Deposition rate / ($\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ion beam current /mA	Vacuum degree / (10^{-3} Pa)
Ge	0.35	50	6.0
ZnS	0.70	40	6.0

后,在真空室自然降温至室温后取出。

4.2 光谱曲线测试

光谱测试设备为美国 Perkin Elmer 公司生产的 Spectrum One 傅里叶红外光谱仪,预热充分后放入实验样片,前表面镀膜后的滤波器的光谱测试曲线如图 10 所示。

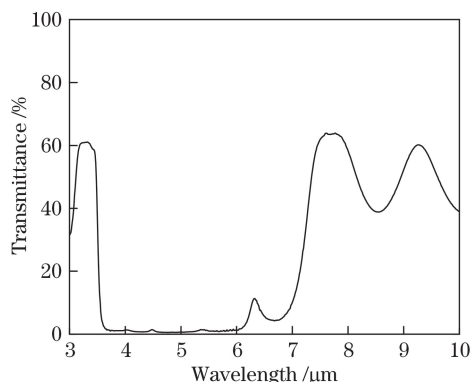


图 10 前表面镀膜后的滤波器的光谱测试曲线

Fig. 10 Tested spectral curves of filter with front-surface-coated film

双面镀膜后的滤波器的光谱测试曲线如图 11 所示,结果 1 为初次的实验结果,通过反演分析调节第 20 层膜的物理厚度得到实验结果 2,在实验结果 2 的基础上通过反演分析调节第 10 层膜的物理厚度得到结果 3。与实验结果 1 相比,实验结果 3 的第 20 层膜的物理厚度增大了 14 nm,第 10 层膜的物理厚度减小了 10 nm,7.67 μm 通带的峰值透射率从 40% 提升到了 80% 以上。

通过光谱仪测得实验结果 3 的滤光片在 3.16~3.46 μm 的平均透射率为 85.97%,通带的峰值透射率为 89.25%,7.64~7.70 μm 的平均透射率为 80.25%,窄带的峰值透射率为 81.97%,截止区 3.71~7.47 μm 的平均透射率为 0.36%,7.87~10 μm 的平均透射率为 0.36%,两截止区的平均透射率均小于 1%,满足技术参数要求。

4.3 膜层附着力测试

前表面膜层的物理厚度为 8 μm ,后表面膜层的物理厚度为 12 μm ,薄膜物理厚度大,需要对前后表面进行附着力测试。由于 1 mm 锆片太薄,在测试中容易毁坏样片,因此在薄膜制备时放入 3 mm 的

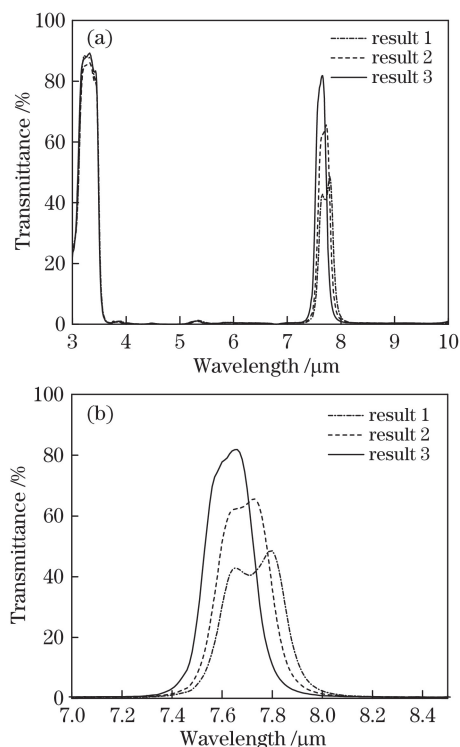


图 11 双面镀膜后的滤波器的光谱测试曲线。

(a) 3~10 μm ; (b) 7~8.5 μm

Fig. 11 Tested spectral curves of filter with

double-side-coated film. (a) 3-10 μm ; (b) 7-8.5 μm

锆片用于测试薄膜的附着力。在厚度为 3 mm 锆片上用粘性强度不小于 3 N/cm^2 的胶带沿膜层表面迅速拉起,两面重复 10 次均未脱膜。

将测试样片放入沸水中煮 0.5 h,然后用冷水冲击薄膜表面,两侧膜层均未发现脱膜。

5 结 论

通过测定甲烷的红外吸收光谱,确定了滤光片的技术参数。根据薄膜光学理论并借助 OptiLayer 和 TFCalc 软件,得出了具有实验可行性的滤波器设计。通过实验和反演分析,解决了 ZnS 膜折射率偏高、后表面非周期窄带滤光膜制备难的问题,最终制备的双通带滤波器,其 3.16~3.46 μm 的平均透射率为 85.97%,7.64~7.70 μm 的平均透射率为 80.25%,3.71~7.47 μm 的平均透射率为 0.36%,7.87~10 μm 的平均透射率为 0.36%。滤波器的薄膜附着力良好,能够满足探测系统的使用要求。未来将进一步研究减小吸收、散射以及制备工艺环节误差的方法以提高通带透射率。

参 考 文 献

- [1] Liu Y P, Wang X, Li S S, *et al.* Gas concentration

- detection method based on infrared absorption spectroscopy technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0112002.
- 刘永平, 王霞, 李帅帅, 等. 基于红外技术的气体浓度检测方法研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0112002.
- [2] Li J K, Jin W Q, Wang X, *et al.* Review of gas leak infrared imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 513-520.
- 李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 513-520.
- [3] Hagen N, Kester R T, Morlier C G, *et al.* Videorate spectral imaging of gas leaks in the longwave infrared[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8710: 871005.
- [4] Baliga S, Bernascolle P. IR gas imaging in an industrial setting[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7661: 76610K.
- [5] Tegstam J F, Danjoux R. Gas leak detection in the oil and gas industry using infrared optical imaging[J]. *Thermografie-Kolloquium*, 2007(3): 1-10.
- [6] Wang M R, Wang L X, Li J K, *et al.* Spatial concentration distribution model for short-range continuous gas leakage of small amount[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8354: 835414.
- [7] Jiao Y, Xu L, Gao M G, *et al.* Investigation on remote measurement of air pollution by a method of infrared passive scanning imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1754-1757.
- 焦洋, 徐亮, 高闽光, 等. 污染气体扫描成像红外被动遥测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1754-1757.
- [8] Bi G L, Zhao J, Sui L, *et al.* SF6 leak detection and location system based on infrared image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3): 76-80.
- 毕国玲, 赵建, 隋龙, 等. 基于红外图像的SF6检漏定位系统[J]. *光电工程*, 2011, 38(3): 76-80.
- [9] Xiong S F, Fu X H, Liu D M, *et al.* Study and fabrication of narrow-band filter film in methane gas detection and recognition system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0303003.
- 熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 甲烷气体探测与识别系统窄带滤光膜的研制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0303003.
- [10] Xiong S F, Fu X H, Liu D M, *et al.* Study on narrow-band filter based on infrared absorption characteristics of methane gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1023003.
- 熊仕富, 付秀华, 刘冬梅, 等. 基于甲烷气体红外吸收特性窄带滤波器的研究 [J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 1023003.
- [11] Chen Y A. Design of online monitoring system for methane gas based on infrared spectrum absorption[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 17-19.
- 陈友安. 基于红外光谱吸收的甲烷气体在线监测系统设计[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 17-19.
- [12] Yu H Z. Infrared optical material[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 54-60.
- 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 54-60.
- [13] Fu X H, Chen Z H, Zhang J, *et al.* Development of short-medium wave energy regulation filter in infrared simulation system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0507001.
- 付秀华, 陈志航, 张静, 等. 红外仿真系统短中波能量调节滤波器的研制 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0507001.
- [14] Fu X H, Jiang H Y, Zhang J, *et al.* Preparation of short and medium wave infrared anti-reflective coating based on chalcogenide glass[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0903002.
- 付秀华, 姜洪妍, 张静, 等. 基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0903002.
- [15] Tang J F, Gu P F, Liu X, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 114-118.
- 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 114-118.
- [16] Fu X H, Xiong S F, Liu D M, *et al.* Study and fabrication of wide angle and broad spectrum gray adjustment film in infrared imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0531001.
- 付秀华, 熊仕富, 刘冬梅, 等. 大角度宽光谱红外成像系统灰度调节膜的研制 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0531001.
- [17] Luo H H, Liu D Q, Yin X, *et al.* Packing density of germanium thin films at different deposited temperature[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(12): 90-93.
- 罗海瀚, 刘定权, 尹欣, 等. 锗(Ge)光学薄膜在不同沉积温度下的聚集密度研究[J]. *光电工程*, 2011, 38(12): 90-93.
- [18] Feng Y D, Qin Y, Yu T Y. Influence of ion-assisted deposition on crystal structures and optical characteristics of ZnS films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 103101.
- 冯毅东, 秦杨, 于天燕. 离子辅助沉积对ZnS薄膜晶体结构及光学特性的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 103101.